

4 Wärmeübertragung durch Temperaturstrahlung

Als Wärmestrahlung bezeichnet man die in einem bestimmten Bereich der Wellenlängen und Temperaturen auftretende Energiestrahlung (elektromagnetische Strahlung). Nach den Wellenlängen unterscheidet man:

	Wellenlänge λ [μm]
Höhen-, Gamma-, Röntgenstrahlung	$< 0,02 \mu\text{m}$
Ultraviolette Strahlung	$0,02 \dots 0,4 \mu\text{m}$
Sichtbare Strahlung	$0,4 \dots 0,75 \mu\text{m}$
Infrarote Strahlung	$0,75 \dots 800 \mu\text{m}$
Elektrische Wellen	$> 0,2 \text{ mm}$

Die Energiestrahlung ($\lambda > 0,75 \mu\text{m}$), die Infrarotstrahlung, ist heiztechnisch von besonderer Bedeutung, da der Hauptteil der bei technischen Wärmestrahlvorgängen übertragenen Wärmeleistung auf Wellenlängen zwischen $0,8$ und $400 \mu\text{m}$ entfällt. Der Begriff Wärmestrahlung ist identisch mit Infrarotstrahlung.

Die wichtigsten Begriffe der Wärmestrahlung, die in der Praxis auch als Temperaturstrahlung bezeichnet wird, sind die *Emission* (Aussenden der Energie), die *Absorption* und *Reflexion* (Schlucken und Rückwerfen der auftreffenden Energie).

Von der ankommenden Strahlung wird

- ein Teil hindurchgelassen (transmittiert),
- ein Teil absorbiert und
- ein Teil reflektiert.

Die Summe ergibt immer 100 %:

$$r + a + \tau = 1 \tag{4.1}$$

$$r = \frac{\text{reflektierte Strahlung}}{\text{auftreffende Strahlung}} = \text{Reflexionsgrad}$$

$$a = \frac{\text{absorbierte Strahlung}}{\text{auftreffende Strahlung}} = \text{Absorptionsgrad}$$

$$\tau = \frac{\text{durchgehende Strahlung}}{\text{auftreffende Strahlung}} = \text{Transmissionsgrad}$$

4 Wärmeübertragung durch Temperaturstrahlung

Gase wie trockene Luft sind für Wärmestrahlung praktisch voll durchlässig (diatherm); eine Ausnahme bilden unter anderem H₂O (Wasserdampf), CO₂, CO, SO₂ (mehratomige Gase), die in unterschiedlichen Wellenlängenbereichen absorbieren und emittieren.

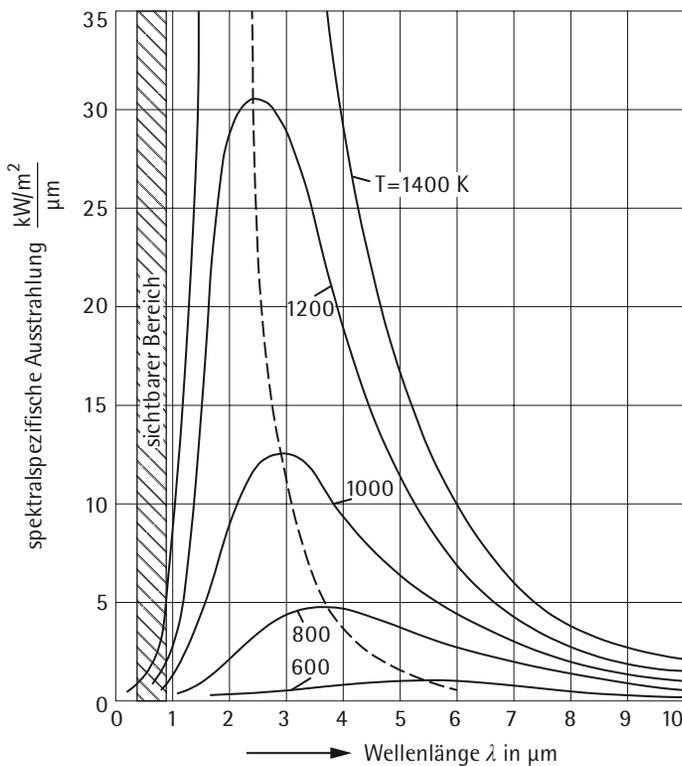
Feste Körper sind für Wärmestrahlen undurchlässig.

4.1 Grundgesetze

Die *Strahlungsintensität* (Wärmestromdichte je Welleneinheit) steigt mit der Temperatur und durchläuft in Abhängigkeit von der Wellenlänge ein Maximum (Planck'sches Strahlungsgesetz).

Einen Körper, der alle auftreffenden Strahlen absorbiert, bezeichnet man als *schwarzen Körper*, dafür gilt das *Planck'sche Strahlungsgesetz*:

$$\dot{\epsilon}_{\lambda S} = \text{konst.} \cdot \frac{\lambda^{-5}}{e^{\frac{h \cdot c_0}{\lambda \cdot k \cdot T}} - 1} \quad \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^3} \right] = \frac{h \cdot c_0^2}{\lambda^5} \cdot \frac{2}{e^{\frac{h \cdot c_0}{\lambda \cdot k \cdot T}} - 1}$$



$$h = 6,6262 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$$

Planck'sches
Wirkungsquantum

$$k = 1,38 \cdot 10^{-13} \text{ J/K}$$

Boltzmann-Konstante

$$c_0 = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

Lichtgeschwindigkeit
im Vakuum

λ = Wellenlänge der
Strahlung [m]

T = Temperatur des
Strahlers [K]

Abb. 4.1: Spektrale spezifische Ausstrahlung des schwarzen Körpers

Die Fläche unter der Temperaturkurve in Abb. 4.1 stellt die spezifische Ausstrahlungsdichte $\dot{E}_{\lambda,S}$ dar.

4.1.1 Emissionsgrad (Stefan-Boltzmann-Gesetz)¹

Die gesamte Strahlungsleistung (Emission) einer *schwarzen Oberfläche* beträgt:

$$\dot{E}_S = \sigma \cdot T^4 \cdot A \quad [\text{W}] \quad (4.2)$$

bzw. auf die Fläche bezogen:

$$\dot{q}_S = \sigma \cdot T^4 \quad [\text{W/m}^2]; \quad \left(\dot{q}_S = \frac{\dot{E}_S}{A} \right) \quad (4.3)$$

\dot{E}_S = Gesamtstrahlungsenergie

T = absolute Temperatur [K]

A = Emissionsfläche [m²]

σ = Strahlungskonstante $5,67 \cdot 10^{-8}$ [W/(m²·K⁴)] (Stefan-Boltzmann-Konstante)

Die meisten realen Körper sind „grau“, sie emittieren einen jeweils gleichen Anteil ε ($\varepsilon = \text{konst.} < 1$) der spektralen spezifischen Ausstrahlung des schwarzen Körpers. Reale Strahler emittieren weniger Energie. Für den „grauen“ Strahler gilt mit dem Emissionsgrad $\varepsilon < 1$ (siehe Anhang):

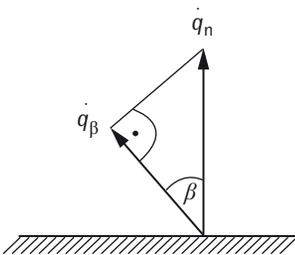
$$\dot{E} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \cdot A \quad [\text{W}] \quad (4.4)$$

bzw.

$$\dot{q} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad [\text{W/m}^2] \quad (4.5)$$

Der spezifische Energiestrom in Normalrichtung \dot{q}_n (d. h. senkrecht zur Emissionsfläche A) beträgt:

$$\dot{q}_n = \frac{\dot{q}_S}{\pi}; \quad \pi \text{ ist hier der Raumwinkel (in Steradian } sr = \text{m}^2/\text{m}^2\text{); } \dot{E}_n \text{ [W/sr]}$$



1. [nach 3]

4 Wärmeübertragung durch Temperaturstrahlung

Schräg zur Fläche verringert sich die gerichtete spezifische Ausstrahlung nach dem *Lambert'schen Richtungsgesetz* zu

$$\dot{q}_\beta = \dot{q}_n \cdot \cos \beta \quad \left[\text{W/m}^2 \right] \quad (4.6)$$

Bei $\beta = 0$, also längs der Fläche, ist $\dot{q}_\beta = 0$. Dadurch erscheint eine strahlende Kugel (Sonne, Mond) als Kreisscheibe.

Beispiel 14

Ein gasbeheizter keramischer Strahler mit 720 cm^2 großer ebener Oberfläche hat eine Temperatur von $800 \text{ }^\circ\text{C}$. Gesucht sind:

- die spezifische Ausstrahlung und die Strahlungsleistung,
- die gerichtete spezifische Ausstrahlung senkrecht zum Strahler,
- die gerichtete spezifische Ausstrahlung in Richtung Beobachter, der den Strahler in einem Winkel von 30° zur Senkrechten sieht.

zu a) Gleichung 4.5: $\dot{q}_s = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4$

$$\varepsilon = 0,93 \text{ (Ziegel, s. Anhang)}$$

$$\dot{q}_s = 0,93 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot 1073^4 = 69,92 \text{ kW/m}^2$$

$$\text{lt. Gleichung 4.4: } \dot{E} = \dot{q}_s \cdot A = 69,92 \cdot 0,072 = 5,03 \text{ kW}$$

$$\text{zu b) } \dot{q}_n = \frac{\dot{q}}{\pi} = \frac{69,92}{3,14} = 22,27 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2 \cdot \text{sr}}$$

$$\text{zu c) lt. Gleichung 4.6: } \dot{q}_\beta = \dot{q}_n \cdot \cos 30^\circ = 22,27 \cdot 0,866 = 19,3 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2 \cdot \text{sr}}$$

4.1.2 Absorptionsgrad (Kirchhoff'sches Gesetz)

Die auf einen strahlungsundurchlässigen Körper auftreffende Wärmestrahlung wird entweder geschluckt (absorbiert) oder zurückgeworfen (reflektiert). Der geschluckte Anteil wird durch den *Absorptionsgrad* a , der zurückgeworfene Anteil durch den *Reflexionsgrad* r gekennzeichnet (siehe Gleichung 4.1):

$$a + r = 1$$

Für den schwarzen Körper mit $a = 1$ und $r = 0$ gilt *regelmäßige Reflexion*, wenn der zurückgeworfene mit dem einfallenden Strahl und der Flächennormalen in einer Ebene liegt und der Reflexionswinkel gleich dem Einfallswinkel ist. Wird der einfallende Strahl nach vielen Richtungen teilreflektiert, so spricht man von *diffuser Reflexion*.

Über den Zusammenhang zwischen Emissionsgrad und Absorptionsgrad eines Körpers gibt das *Kirchhoff'sche Gesetz* Aufschluss.

Der Emissionsgrad ε eines Strahlers ist identisch mit seinem Absorptionsgrad α bei gleicher Temperatur und gilt für den schwarzen und grauen Strahler gleichermaßen:

$$\varepsilon = \alpha$$

oder:

Das *Emissionsvermögen* \dot{E} eines beliebigen Körpers verhält sich zum Emissionsvermögen \dot{E}_s des schwarzen Körpers wie die entsprechenden Absorptionsgrade:

$$\dot{E} / \dot{E}_s = \varepsilon = \alpha / \alpha_s ; \alpha_s = 1 \quad (4.7)$$

daraus folgt $\varepsilon = \alpha$.

Flächen mit hohem Absorptionsvermögen strahlen also stark, solche mit geringem Absorptionsvermögen (polierte Metallflächen) wenig.

Zum Beispiel Weißlacke $\alpha \approx 0,2$, Dachpappe $\alpha > 0,9$, Beton $\alpha \approx 0,6$, Neuschnee $\alpha \approx 0,1$, Gras $\alpha \approx 0,9$

Bei solarer Strahlung (Infrarotanteil ca. 44 %) ist der Absorptionsgrad α aus Angaben für die Albedo ermittelbar. *Albedo* (ca. 0,3) ist das Verhältnis der diffus reflektierten zur einfallenden Solarstrahlung.

4.2 Wärmeaustausch durch Strahlung

Zwei Körper unterschiedlicher Temperatur tauschen gegenseitig Energie durch Strahlung aus. Hierbei gibt der wärmere Körper mehr Energie als der kältere ab, sodass insgesamt Energie vom wärmeren (1) an den kälteren (2) übergeht.

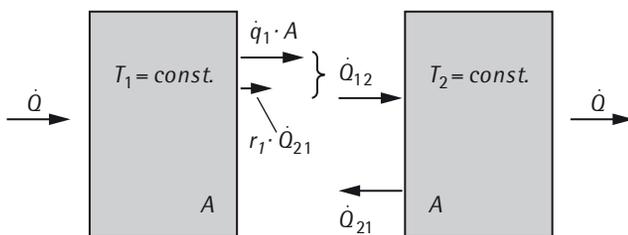


Abb. 4.2: Wärmeübertragung durch Strahlung bei ebenen Wänden

Der Körper 1 sendet den Gesamtenergiestrom \dot{Q}_{12} , der Körper 2 den Gesamtenergiestrom \dot{Q}_{21} aus. \dot{Q}_{12} setzt sich aus der emittierten Strahlungsleistung $\dot{E}_1 = \dot{q}_1 \cdot A$ und dem reflektierten Energiestrom $r_1 \cdot \dot{Q}_{21}$ zusammen:

$$\dot{Q}_{12} = \dot{q}_1 \cdot A + r_1 \cdot \dot{Q}_{21}$$